

大口径反射镜子孔径拼接自检验精度分析

闫力松^{1,2}, 王孝坤¹, 郑立功¹, 王润强³, 张学军¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春奥普光电技术股份有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了解决大口径反射镜子孔径拼接精度评价的问题, 提出了自检验的子孔径拼接精度分析方法, 实现了对大口径反射镜拼接精度的分析评价, 同时提供了一种拼接精度检测方法。自检验即利用子孔径检测面形对拼接获得的拼接结果进行拼接精度检验。讨论了相应的精度评价指标及计算方法, 并结合工程实例, 利用 $\phi 600$ mm 干涉仪实现了对 $\phi 800$ mm 平面镜的拼接测量。以自检验的评价方式对拼接精度进行了分析, 结果表明, 拼接结果是准确的, 同时验证了以自检验方式评价拼接精度的可靠性与准确性。

关键词: 光学检测; 精度分析; 大口径反射镜; 子孔径拼接; 自检验

中图分类号: O439; O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1920-05

Large-diameter mirror stitching accuracy analysis based on self-test

Yan Lisong^{1,2}, Wang Xiaokun¹, Zheng Ligong¹, Wang Runqiang³, Zhang Xuejun¹

- (1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Changchun UP Optotech Co. Ltd, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to solve the problem evaluating the stitching accuracy of large-diameter reflecting mirror, a kind of stitching accuracy evaluating method called self-test was proposed in the article, realizing the analysis and evaluation to the stitching accuracy of large-diameter reflector mirror, while providing a method measuring the stitching precision. Self-test was a kind of method testing the accuracy of stitching result with sub-aperture measuring result. In the article, relative accuracy evaluation indexes and their calculation methods were discussed. As a project example, $\phi 800$ mm plane mirror was splicing measured with a $\phi 600$ mm interferometer and stitching accuracy was evaluated with the self-test method. It shows that the stitching is accurate and it's reliable and precise to assess stitching accuracy by the way of self-test at the same time.

Key words: optical testing; accuracy analysis; large mirror; sub-aperture stitching; self-test

收稿日期: 2013-10-05; 修订日期: 2013-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61036015); 国家高技术研究发展计划(O8663NJ090)

作者简介: 闫力松(1988-), 男, 博士生, 主要从事光学检测技术方面的研究。Email: yanlisong1988@163.com

导师简介: 张学军(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学加工检测方面的研究。Email: zxj@ciomp.ac.cn

0 引言

作为一种高精度光学镜面测量方法,子孔径干涉测量的核心思想是“以小检大”,可以有效提高分辨率,增大测量范围。可以直接对平面、球面以及陡度不大的非球面进行测量。

子孔径干涉检测在20世纪80年代由Arizona光学中心的C.J.Kim提出,最初拼接检测中各子孔径间是不重叠的,主要有两种相应的拼接算法,Kwon-Thunen法^[1]与同步拟合方法^[2],二者均基于Zernike多项式描述波前^[3],但是在波前存在局部不规则性^[4]时,两种算法对波前的描述均遇到了困难。而后由Stuhlinger提出了DPM方法(Discrete Phase Method)^[4],用大量离散点上的光学相位测量值对波前进行描述,该方法通过子孔径之间的重叠区域,利用最小二乘法拟合估计各子孔径间的相对平移与倾斜,实现拼接。2003年,QED公司研制出了第一台子孔径拼接干涉仪,适用于200mm以下的平面、球面、适度偏离量的非球面检测。90年代以来,国内多家单位陆续对子孔径拼接展开了研究,其中国防科技大学从几何学观点出发,对非球面子孔径拼接干涉测量进行了研究,提出了SASL算法^[5]与SSASL算法^[6]。南京理工大学成功把子孔径测试技术应用到了相移平面干涉仪中^[7]。

对于小口径光学镜面的拼接检测,可以将子孔径拼接检测的结果与全口径测试结果进行对比,以全口径测试结果作为拼接测量结果的参考值,对拼接精度进行评价。然而对于大口径光学镜面,无法直接对其进行全口径测量,对拼接检测结果的精度分析变得困难。文中提出了自检验的拼接精度检测方式,实现对子孔径拼接精度的检验。自检验即利用子孔径检测面形对拼接获得的拼接结果进行精度检验。在检测中,对被检面形任取一个或几个子孔径区域作为自检区域(自检区域应区别于用于拼接的子孔径位置),将拼接所得面形与自检区域干涉检测所获得的面形进行对比,评价检测精度。文中基于工程实例,对 $\phi 800$ mm平面镜的拼接测量结果进行了精度评价分析,验证自检验作为评价子孔径拼接检测精度方法的可靠性与准确性。

1 子孔径拼接精度评价

在光学加工与检测领域,PV(峰谷值)与RMS(均

方根值)作为光学镜面评价的通用评价指标,并不能真实、全面地反映一个面形的特征。无论是PV值还是RMS值,均只能反映被测镜面面形误差大小,并不能完全反映镜面面形误差分布。对于PV值或RMS值基本相同的两个面形,其面形误差分布可能迥然不同。

在对拼接面形与自检面形进行比较时,应对两个面形按照像素对应关系逐点相减,从而得到两个面形的残差图。残差图直接反映出两个面形的差别,同时可以计算出残差图的PV值与RMS值,作为评价二者差异的重要指标之一。

虽然残差图很好地反映了两个面形的差别,但并不能直接将其作为评价拼接精度的最终指标,即并不能得出结论:拼接面形与自检面形的残差越小,拼接精度越高。相对残差是拼接精度评价的重要指标。相对残差定义为:

$$\Delta_{R(pv)} = \frac{\Delta pv}{pv} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta_{R(rms)} = \frac{\Delta rms}{rms} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta_{R(pv)}$ 为PV相对残差; $\Delta_{R(rms)}$ 为RMS相对残差。 Δpv 与 Δrms 分别代表残差图的PV与RMS值, pv 与 rms 代表拼接结果的峰谷值与均方根值。通常被检面形自身PV值、RMS值越大,自检验残差越大,相对残差越小。

对于拼接残差 Z ,其分布为正态分布^[8]。对应的概率密度函数为:

$$f(dz) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(dz-u)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < dz < \infty \quad (3)$$

式中: dz 为每个数据点的残差; u 、 σ 分别为均值与方差。相应的单次子孔径拼接数据残差 Z_1 为拼接残差 Z 的一个样本,假设样本容量为 N ,则对应样本 Z_1 ,其均值为:

$$m_{dz} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} dz(n) \quad (4)$$

方差为:

$$\sigma_{dz} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [dz(n) - m_{dz}]^2 \quad (5)$$

可以证明 m_{dz} 为 u 的无偏估计, σ_{dz} 为 σ 的渐近无偏估计,同时 m_{dz} 、 σ_{dz} 分别为 u 、 σ 的一致估计。通过样本 Z_1 获得的估计值 m_{dz} 、 σ_{dz} 计算得出拼接残差

估计概率密度分布函数为:

$$f(dz) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{dz}} e^{-\frac{(dz - m_{dz})^2}{2\sigma_{dz}^2}} \quad (6)$$

分别计算拼接残差在置信区间 $m_{dz} - \sigma_{dz} < dz < m_{dz} + \sigma_{dz}$, $m_{dz} - 2\sigma_{dz} < dz < m_{dz} + 2\sigma_{dz}$, $m_{dz} - 3\sigma_{dz} < dz < m_{dz} + 3\sigma_{dz}$ 的分布概率, 在理想高斯分布中, 其概率分布分别为 68.26%、95.44%、99.74%, 将拼接残差在置信区间内分布概率与理想高斯置信区间内概率分布进行比较, 作为衡量拼接精度的重要指标之一。

文中基于实际工程项目, 应用上述子孔径拼接精度评价体系对拼接结果进行了精度分析, 同时对拼接结果的可信性进行了验证。

2 实验结果及分析

在实际工程中, 利用 $\phi 600 \text{ mm}$ 干涉仪实现了对 $\phi 800 \text{ mm}$ 平面镜的拼接测量。实验装置如图 1 所示。

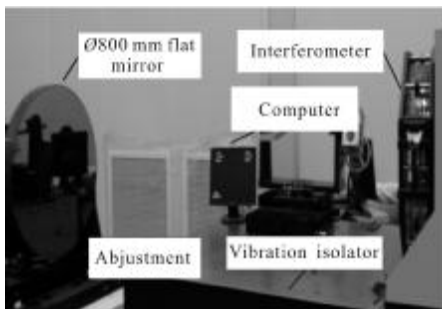


图 1 实验装置图
Fig.1 Experiment setup

拼接中, 采用七个子孔径完成了对该镜面的全口径测量, 子孔径规划如图 2 所示, 基于靶标记的方式实现了各子孔径间的对准, 拼接结果如图 3 所示。

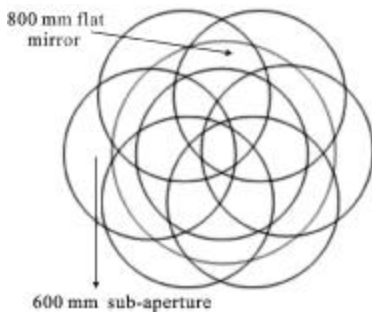


图 2 子孔径分布图
Fig.2 Distribution of subapertures

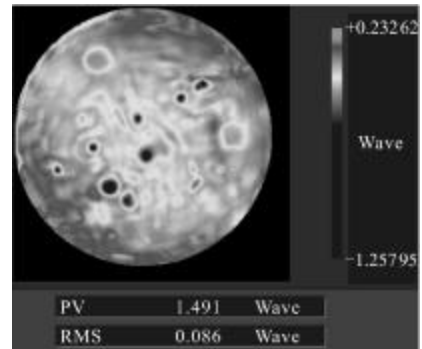
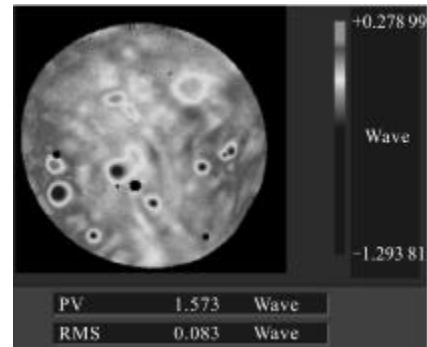


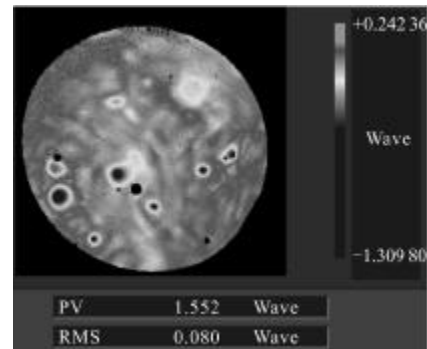
图 3 拼接后全口径面形分布图

Fig.3 Phase map of whole aperture after stitching

其中拼接结果 PV:1.491 λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$), RMS:0.086 λ 。实际检测时, 除对规划中的七个子孔径进行干涉检测外, 另选取自检验子孔径, 并对其进行干涉测量。自检验子孔径位置区别于拼接子孔径位置, 为了保证自检验子孔径的干涉检测精度, 对自检验子孔径进行了多次重复测量, 任意从中选取两次测量结果, 如图 4 所示, 其中第一次自检验结果 PV:1.573 λ , RMS:0.083 λ , 第二次检测结果 PV:1.552 λ , RMS:0.080 λ 。



(a) 第一次测量结果
(a) Testing result 1



(b) 第二次测量结果
(b) Testing result 2

图 4 自检验子孔径测量结果

Fig.4 Testing results of self-test subaperture

將兩次檢測獲得的相位數據按照對應像素逐點相減,從而獲得兩次檢測結果的面形殘差圖,如圖 5 所示,即檢測中的隨機誤差圖。兩次檢測結果殘差圖 PV:0.047λ,RMS:0.003λ。

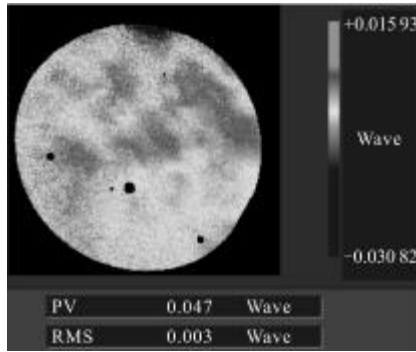


圖 5 兩次自檢驗結果殘差圖
Fig.5 Residual map between two self-test results

為了精確,全面的评价子孔徑拼接的測量精度,將拼接得到的相位數據與自檢驗檢測得到的相位數據按照對應像素逐點相減,從而獲得面形殘差圖,殘差圖如圖 6 所示。其中拼接結果與自檢驗結果相減得到的殘差 PV:0.049λ,RMS:0.003λ。

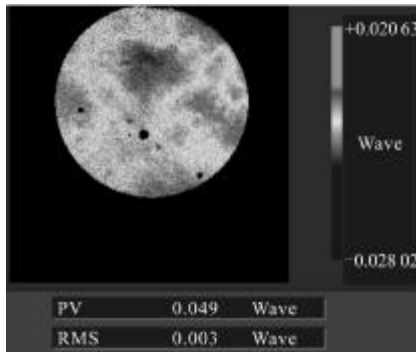


圖 6 拼接結果與自檢驗孔徑檢測結果量殘差圖
Fig.6 Residual map between stitching result and testing result of self-test subaperture

將圖 5 與圖 6 所得到的殘差結果進行比較,

$$\Delta pv = 0.049\lambda - 0.047\lambda = 0.002\lambda \quad (7)$$

$$\Delta rms = 0.003\lambda - 0.003\lambda = 0 \quad (8)$$

由公式(7)與公式(8)計算結果可以得出,拼接結果與自檢驗結果相減得到的殘差同兩次自檢驗測量所得到的殘差即測量中的隨機誤差在數值上是一致的。為了進一步對拼接精度進行评价,分別計算以上兩種測量結果殘差的相對偏差量。

拼接結果與自檢驗結果殘差的相對偏差量為:

$$\Delta_{R(pv)} = \frac{\Delta pv}{pv} \times 100\% = \frac{0.049\lambda}{1.491\lambda} \times 100\% = 3.29\% \quad (9)$$

$$\Delta_{R(rms)} = \frac{\Delta rms}{rms} \times 100\% = \frac{0.003\lambda}{0.086\lambda} \times 100\% = 3.49\% \quad (10)$$

兩次自檢驗測量所得到的殘差結果的相對偏差量為:

$$\Delta_{R(pv)} = \frac{\Delta pv}{pv} \times 100\% = \frac{0.047\lambda}{1.573\lambda} \times 100\% = 2.99\% \quad (11)$$

$$\Delta_{R(rms)} = \frac{\Delta rms}{rms} \times 100\% = \frac{0.003\lambda}{0.083\lambda} \times 100\% = 3.61\% \quad (12)$$

對於自檢驗殘差結果 Z_i (圖 6 所示結果),其均值:

$$m_{dz} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} dz(n) = 0.049\lambda \quad (13)$$

方差:

$$\sigma_{dz} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [dz(n) - m_{dz}]^2 = 0.003\lambda \quad (14)$$

分別計算自檢驗殘差結果在不同置信區間內的概率:

$$P(m_{dz} - \sigma_{dz} < dz < m_{dz} + \sigma_{dz}) = \frac{N_1}{N} = \frac{8.0126 \times 10^5}{1.1761 \times 10^6} \times 100\% = 68.13\% \quad (15)$$

$$P(m_{dz} - 2\sigma_{dz} < dz < m_{dz} + 2\sigma_{dz}) = \frac{N_1}{N} = \frac{1.1188 \times 10^6}{1.1761 \times 10^6} \times 100\% = 95.13\% \quad (16)$$

$$P(m_{dz} - 3\sigma_{dz} < dz < m_{dz} + 3\sigma_{dz}) = \frac{N_1}{N} = \frac{1.1727 \times 10^6}{1.1761 \times 10^6} \times 100\% = 99.17\% \quad (17)$$

由公式(7)~(17)可以看出,拼接結果與自檢驗結果相減得到的殘差同測量中的隨機誤差在數值上是一致的,同時拼接殘差在置信區間內的概率分布與高斯函數的概率分布是一致的,從以上分析可以得出:拼接結果在自檢驗子孔徑區域的面形與子孔徑區域自檢測得到的面形是一致的,拼接結果與自檢驗孔徑檢測結果殘差滿足高斯分布,驗證了拼接結果的可靠性與準確性。

3 結 論

針對在檢測大口徑光學反射鏡時,難以對子孔徑拼接結果進行拼接精度檢驗的問題,文中提出了自檢驗的拼接精度檢測方式,並且依據自檢驗精度檢測方式,在工程上實現了對 $\phi 800\text{ mm}$ 平面鏡的拼

接结果精度检验,验证了拼接结果的可靠性与准确性,同时也证明了自检验作为一种子孔径拼接精度检测方法的有效性与实用性。该方法具有对设备要求简单,实用性强等诸多优点,为大口径光学镜面的拼接精度检测提供了一种有效可行的方法。

参考文献:

- [1] Thun en J G, Kwon O Y. Full aperture testing with subaperture test optics[C]//SPIE, 1982, 351: 19-27.
- [2] Chow W W, Lawrence G N. Method for subaperture testing interferogram reduction[J]. Opt Lett, 1983, 8: 468-470.
- [3] Jeson S C, Chow W W, Lawrence G N. Subaperture testing approaches: a comparison[J]. Appl Opt, 1984, 23: 740-745.
- [4] Stuhlinger T W. Subaperture optical testing: experimental verification[C]//SPIE, 1968, 656: 118-127.
- [5] Chen Shanyong, Li Shengyi, Dai Yifan. Iterative algorithm for subaperture stitching interferometry for general surfaces [J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(9): 1929-1936.
- [6] Chen Shanyong, Li Shengyi, Dai Yifan, et al. Iterative algorithm for subaperture stitching test with spherical interferometers[J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(5):1219- 1226.
- [7] Wang Q, Chen J B, Zhu R H, et al. A new technique for testing large optical flat[C]//SPIE, 1993, 2003: 389-397.
- [8] Peng Su. Absolute measurements of large mirrors [D]. USA: The University of Arizona, 2008.